

مدل‌سازی عددی جریان دوفازی در کانال داغ عمودی با استفاده از مدل شار رانشی به روش تصویر

بیزادی، محمد* (۱) - طالبی، سعید (۱) - قریب، مرتضی (۱)

(۱) دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، گروه مهندسی راکتور

چکیده:

در این کار یک روش عددی مناسب برای حل دایم معادلات یک بعدی شار رانشی ارایه شده است. مدل شار رانشی، یک مدل رایج و پرکاربرد در مدل‌سازی جریان‌های دوفازی می‌باشد که با گرفتن جریان به صورت مخلوط و همچنین در نظر گرفتن سرعت نسبی دو فاز فرموله می‌شود. در این کار برای افزایش پایداری عددی و کاهش خطا برای بدست آوردن غلظت سطح تماس مشترک بین دوفاز (که یک فاکتور مهم در جابه جایی جرم، انرژی و ممتنوم بین دوفاز است). به جای استفاده از روابط تجربی از معادله انتقال سطح تماس مشترک استفاده شده است. در آخر نتایج حاصله با نتایج تجربی و کدهای معتبر هسته‌ای مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: کسر خلا، جریان دوفازی، غلظت سطح تماس مشترک، روش تصویر

مقدمه:

جریان دوفازی، نقش مهمی در بسیاری از کاربردهای صنعتی و پدیده‌های طبیعی دارد از جمله در نیروگاه‌های تولید برق برای انتقال انرژی از کوره، در مهندسی هسته‌ای برای طراحی و آنالیز رفتار راکتورهای آب جوشان (BWR) و یا در بررسی ایمنی راکتورهای آب تحت فشار (PWR)، در بررسی حوادث هسته‌ای مانند حادثه از دست رفتن خنک کننده، در مهندسی مکانیک برای بررسی کاویتاسیون پمپ، در صنعت نفت برای استخراج و طراحی خطوط انتقال نفت و گاز، در سیستم‌هایی که در آنها جوشش یا چگالش رخ می‌دهد مانند مبدل‌های حرارتی، کندانسورها، و در صنایع مختلف دیگر جریان دوفازی از اهمیت فراوانی برخوردار است.

از آنجا که جریان‌های دوفازی به صورت گسترده در صنایع مختلف استفاده می‌شود دانشمندان و محققین زیادی در زمینه جریانات دوفازی و مدل‌سازی این جریانات کارهای فراوانی انجام داده‌اند. برای مدل‌سازی جریان‌های دوفازی دو مدل کلی شار رانشی^۱ و مدل دو سیالی^۲ وجود دارند. ناپایداری عددی و عدم

¹ Drift Flux Model

² Two Fluid Model

قطعیت، دو مشکل مدل دو سیالی هستند. مدل شار رانشی که برای اولین بار توسط زوبر و فیندلی توسعه یافت مدلی مناسب برای تخمین کسر خلا^۱ در سیستم های دو فازی است. این مدل از پایداری عددی بهتری و همچنین از زمان CPU کمتری نسبت به مدل دوسیالی برخوردار است. و همچنین مدل شار رانشی چهار معادله ایی به خوبی برای محدوده وسیعی از پدیده های ترموهیدرولیکی در یک راکتور آب سبک، کفایت می کنند.

مدل شار رانشی به وفور در محاسبات ترموهیدرولیک هسته ای مورد استفاده قرار گرفته است؛ اخیراً، لی و پارک بر اساس مدل شار رانشی یک نرم افزار ترموهیدرولیکی توسعه دادند. نرم افزار RETAN3D- [۱] برای شبیه سازی از مدل شار رانشی استفاده می کند و پروژه OVAP-FLICA [۲] توس فیلیون و همکاران برای شبیه سازی قلب راکتور انجام شده است و همچنین طالبی و همکاران [۳] جریانات دوفازی یک بعدی در یک کانال داغ عمودی را با استفاده از مدل شار رانشی مدل سازی کرده اند .

در آنالیز جریان دوفازی، کسر خلا^۲ و غلظت سطح تماس بین دو فاز^۳ (IAC) از پارامترهای هندسی مهم جریان دو فازی هستند که به محققین کمک می کنند تا درک بهتری از رفتار حاکم بر جریان داشته باشند. برای بدست آوردن غلظت سطح تماس بین دوفاز از معادله انتقال سطح تماس^۴ (IATE) استفاده می کنند این معادله توسط ایشی و کوکاموس تافاوگولاری بر پایه معادله انتقال بولتزنمن که یک معادله آماری برای توصیف توزیع ذرات است ارایه شد چون سطح تماس دو فاز نیز به تعداد ذرات داخل جریان بستگی دارد پس می توان بر پایه معادله انتقال بولتزنمن آن را فرموله کرد.

در بسیاری از کدهای هسته ای که از مدل دو سیالی^۵ و یا مدل شار رانشی^۶ استفاده شده است مانند RELAP5، COBRA، TRAC، WAHA3، CATHER، ATHLET و... برای به دست آوردن IAC از روابط تجربی که به رژیم جریان وابسته است، استفاده شده است. با توجه به این که IAC نقش مهمی در پیش بینی و توزیع کسر خلا دارد، استفاده از این روابط تجربی در بعضی از رفتارهای گذرا^۷ و ... می تواند باعث پیش بینی نادرستی از کسر خلا و توزیع آن در طول کانال شود. هم چنین چون روابط تجربی IAC بر پایه رژیم های جریان است و به صورت توابع گسسته در معادلات ظاهر می شود، ترکیب این توابع گسسته باعث افزایش خطا و ناپایداری عددی در حل عددی معادلات می شود که برای برطرف کردن این موارد بهتر است IAC را از حل معادله IATE به دست آورد.

¹ Void fraction

² void fraction

³ Interfaeial area concenitration

⁴ Interfacia Area Transport Equation

⁵ Tow Fluid Model

⁶ Drift Flux Model

⁷ Transient

در این مقاله سعی شده است تا یک جریان دوفازی داخل کانال عمودی که تحت شارحرارتی قرار دارد را با استفاده از مدل شار رانشی مدل‌سازی شود همچنین برای بدست آوردن IAC از معادله IATE استفاده شده است استفاده از این معادله به جای روابط تجربی باعث شده تا از خطا کاسته شود و همچنین در حل عددی، معادلات از پایداری عدی بهتری به وجود آید برای حل معادلات از روش تصویر استفاده شده است اساس کار روش تصویر بر پایه جداسازی معادلات سیمولوله‌ای و غیرچرخشی است و در آن معادله ممتوم به دو بخش تقسیم شده و معادله پیوستگی مخلوط در مرحله دوم اعمال می‌شود در پایان نتایج بدست آمده از این شبیه‌سازی با استفاده از کد Relap5 و داده‌های تجربی صحت سنجی می‌شود.

روش کار :

مدل شار رانشی یک بعدی که با متوسط گیری روی مساحت سطح مقطع حاصل می‌شود برای مسائل پیچیده مهندسی بسیار کارا و مفید است. با متوسط گیری روی سطح اطلاعات مربوط به تغییرات متغیرها در راستایی عمود بر جهت جریان در یک کانال؛ اساساً از دست می‌روند. بنابراین انتقال تکانه و انرژی دیواره و سیال باید با استفاده از روابط تجربی یا مدل‌های ساده شده مدل شود در این کار از معادلات بدست‌آمده توسط ایشی برای مدل شار رانشی یک بعدی استفاده شده است [۴] که عبارتند از

معادله پیوستگی مخلوط

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_m + \frac{\partial}{\partial z} G_m = 0$$

معادله پیوستگی فاز پراکنده:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho_g) + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha \rho V_m) = \Gamma_w + \Gamma_{gl} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\alpha \rho_g \rho_l}{\rho_m} \overline{V_{gl}} \right)$$

معادله تکانه مخلوط:

$$\frac{\partial}{\partial t} (G_m) + \frac{\partial}{\partial z} \left(G_m^2 \left(\frac{x^2}{\alpha \rho_g} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha) \rho_l} \right) \right) = - \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{total}$$

معادله انرژی مخلوط:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m h_m) + \frac{\partial}{\partial z} (h_m G_m) = \frac{4q_w}{D} + \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{G_m}{\rho_m} \left(\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{f_m}{2D} \frac{G_m |G_m|}{\rho_m} \right)$$

در معادلات فوق $\left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{total}$ مجموع افت فشارهای ناشی از گرانث، اصطکاک و شتاب است که از رابطه زیر

به دست می‌آید: [۵]

$$\left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)_{total} = \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)_{gravity} + \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)_{acc} + \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)_{fric}$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_{gravity} = \rho_m g$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_{fric} = \frac{f_m G_m |G_m|}{2D\rho_m}$$

در معادلات فوق $\overline{V_{gl}}$ بیانگر سرعت رانشی است که در این کار از رابطه Chexal-Lellouche [۶] از دقت بهتری برخوردار است استفاده شده است. و Γ_w بیانگر سرعت تبخیر از سطح است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود: [۷]

$$\Gamma_w = \begin{cases} \frac{4q_w''(h_l - h_{cr})}{D_h(h_l^s - h_{cr})(1 + \varepsilon)h_{fg}} h_{cr} \leq h_m \leq h_l^s \\ \frac{4q_w''}{D_h h_{fg}} h_l^s \leq h_m \end{cases}, \varepsilon = \frac{\rho_l [h_l^s - \min(h_l, h_l^s)]}{\rho_g h_{fg}}$$

و همچنین Γ_{gl} نیز بیانگر انتقال جرم بین دوفاز است، اندرسون [۸]. و همکارانش یک مدل انتقال جرم مرزی ارائه دادند. آنها در مدل خود فرض کردند که بخار و مایع در مرز بین هم همیشه در دمای اشباع مربوط به فشار بخار در آن منطقه باشند.

$$\Gamma_{gl} = \frac{h_{gl} A_{gl} (T_l - T^s)}{h_{fg}}$$

که در آن A_{gl} نشان دهنده غلظت سطح تماس مشترک بین دوفاز است که در اکثر کدهای هسته‌ای این ترم با استفاده از روابط تجربی محاسبه می‌شود که باعث افزایش خطا در محاسبات و همچنین چون روابط تجربی به صورت تابع‌های گسسته وارد معادلات می‌شوند باعث افزایش ناپایداری عددی در انجام محاسبات می‌شود در این کار برای کاهش خطا و همچنین پایداری عددی مناسب، غلظت سطح تماس مشترک از حل معادله انتقال سطح تماس مشترک (IATE) بدست می‌آید. این معادله براساس معادله انتقال بولتزمن اولین بار توسط ایشی^۱ و کوکاموس تافاوغولاری^۲ ارائه شد.

$$\frac{\partial a_g}{\partial t} + \nabla \cdot (a_g V_g) = \frac{2a_g}{3\alpha} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{d}{dz} (\alpha V_g) \right) + \varphi_{RC} + \varphi_{TI}$$

¹ Ishi

² Kocamustafaogullari

در این کار برای بدست آوردن ترم‌های چشمه و چاه، معادله IATE از کار هایبیک^۱ و ایشی در سال ۲۰۰۲ [۹] استفاده شده است. که به صورت زیر می‌باشد:

$$\phi_{RC} = C_{RC} \frac{\alpha^2 \varepsilon^{1/3}}{D_b^{5/3} (\alpha_{\max} - \alpha_{\min})} \exp\left(-k_{RC} \sqrt{\frac{W_e}{2}}\right)$$

$$\phi_{TI} = C_{TI} \frac{\alpha(1-\alpha)\varepsilon^{1/3}}{D_b^{5/3} (\alpha_{\max} - \alpha)} \exp\left(-\frac{2k_{TI}}{W_e}\right)$$

$$C_{RC} = 1.82 \times 10^{-8} \alpha \text{Re}^3$$

$$K_{RC} = 1.29$$

$$\alpha_{\max} = 0.741$$

$$C_{TI} = 5.02 \times 10^{-10} \alpha \text{Re}^3$$

$$K_{TI} = 1.59$$

گسسته سازی معادلات

برای گسسته سازی معادلات فوق باید از شبکه جابه‌جا شده استفاده شود تا فشار فیزیکی بدست آید و همچنین گسسته سازی در زمان معادلات به صورت کاملاً صریح صورت گرفته و برای گسسته سازی در مکان از روش بالادست استفاده شده است. به عنوان مثال گسسته سازی معادله ممتوم در شبکه جابه‌جا شده به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{G_{m_i}^* - G_{m_i}^n}{\Delta t} + \left[G_m^2 \left(\frac{x^2}{\alpha_g \rho_g} + \frac{(1-x)^2}{\rho_l (1-\alpha_g)} \right) \right]_{i+1/2}^n - \left[G_m^2 \left(\frac{X^2}{\alpha_g \rho_g} + \frac{(1-X)^2}{\rho_l (1-\alpha_g)} \right) \right]_{i-1/2}^n = \frac{P_i^{n+1} - P_{i-1}^{n+1}}{\Delta z}$$

در گسسته سازی معادلات متغیرهای ترمودینامیکی مانند فشار در مرکز سلول باید محاسبه شود، در گسسته سازی معادلات اگر مقدار متغیر ترمودینامیکی در مرکز سلول قرار نگیرد با متوسط‌گیری مقدار متغیر را در مرکز سلول باید محاسبه شود به عنوان مثال:

$$P_{i+1/2} = \frac{P_i + P_{i+1/2}}{2}$$

همچنین دبی جرمی باید در مرز بین دو سلول محاسبه شود.

روش حل عددی معادلات شار رانشی

روش تصویری یکی از رایج‌ترین روش‌های حل معادلات ناویر استوکس غیر دائم^۲ می‌باشد که توسط چورین^۱ (۱۹۶۸) و تیمان (۱۹۶۹) به طور مستقل پیشنهاد شد و مدل صریح^۲ آن در سال ۱۹۷۱ توسط

^۱ Hibiki

^۲ Transient

فورتین^۳ و همکارانش معرفی گردید. روش فوق، یک روش مرحله ای کسری^۴ با دقت مرتبه اول در زمان است.

اساس روش تصویری بر اساس جداسازی معادله ممتوم به بخش غیر چرخشی و سمیلوله ای است. در این کار از این اصل برای حل معادلات شار رانشی یک بعدی در حالت پایا که در قسمت قبل بیان شد، استفاده

شده است. چون حل معادلات در حالت پایا است تمامی مشتق‌های زمانی $(\frac{\partial}{\partial t})$ معادلات فوق برابر صفر است ولی برای حل معادله ممتوم به روش تصویر حل گذرای معادله در نظر گرفته و با افزایش زمان به حل پایا می‌رسیم.

همانطور که از معادله پیوستگی مشخص است میدان دبی جرمی در حالت پایا یک میدان سمیلوله ای است زیرا دیورژانس آن برابر صفر می باشد.

$$\nabla \cdot G_m = 0$$

همچنین چون کرل گرادیان هر میدانی برابر صفر است پس میدان افت فشار استاتیکی ما نیز یک میدان غیر چرخشی است.

$$\nabla \times \nabla P = 0$$

حال در این روش با جداسازی معادله ممتوم و استفاده از نود کمکی در زمان $G_{m_i}^*$ برای جداسازی معادله ممتوم به دو بخش سمیلوله ای و غیر چرخشی استفاده می شود.

$$\frac{G_{m_i}^* - G_{m_i}^n}{\Delta t} + \left[G_m^2 \left(\frac{x^2}{\alpha_g \rho_g} + \frac{(1-x)^2}{\rho_l (1-\alpha_g)} \right) \right]_{i+1/2}^n - \left[G_m^2 \left(\frac{X^2}{\alpha_g \rho_g} + \frac{(1-X)^2}{\rho_l (1-\alpha_g)} \right) \right]_{i-1/2}^n = 0$$

$$\frac{G_m^{n+1} - G_m^*}{\Delta t} = \nabla P_{total}^{n+1}$$

از دو طرف معادله فوق دیورژانس میگیریم.

$$\frac{\nabla \cdot G_m^{n+1} - \nabla \cdot G_m^*}{\Delta t} = \nabla^2 P_{total}^{n+1}$$

که با ارضای معادله پیوستگی در حالت پایا بدست می‌آید

$$\nabla \cdot G_m^{n+1} = 0$$

$$\frac{-\nabla \cdot G_m^*}{\Delta t} = \nabla^2 P^{n+1}$$

¹ Chorin

² explicitversion

³ Fortin

⁴ fractional method

معادله فوق یک معادله پواسون است که با حل آن فشار در زمان جدید $n+1$ بدست می‌آید. با بدست آمدن فشار با استفاده از بخش دوم معادله ممتوم سرعت در لحظه جدید $n+1$ بدست می‌آید. با ادامه این مسیر تا زمانهای بزرگ معادلات به همگرایی می‌رسند. در حقیقت در روش تصویر با حل غیر دایم معادله ممتوم و میل دادن زمان به مقادیر بزرگ به حل دایم معادله ممتوم می‌رسیم. با حل معادله ممتوم و ارضای معادله پیوستگی مخلوط به روش تصویر مقدار G_m^{n+1} و P^{n+1} بدست می‌آید. سپس با حل معادله انرژی مخلوط و پیوستگی بخار پارامترهای h_m و α بدست می‌آید.

نتایج :

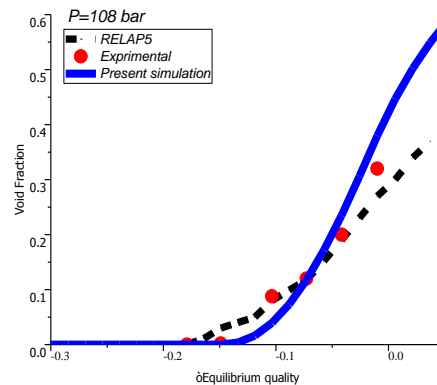
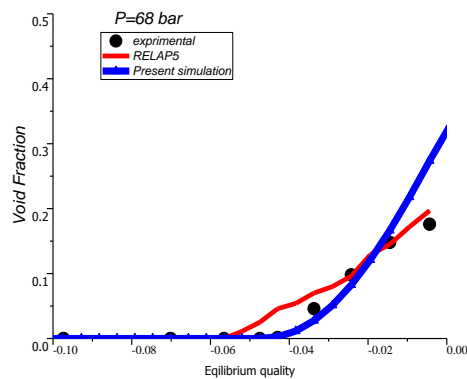
ارائه برای صحت سنجی روش عددی به کار گرفته برای حل معادلات شار رانشی و مدل استفاده شده نتایج را برای یک زیرکانال عمودی که تحت شار حرارتی قرار دارد، در فشارها و دماهای ورودی متات مرد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل با کد RELAP5 و همچنین داده‌های تجربی مقایسه شده است. شرایط اولیه زیرکانال‌های مورد بررسی در جدول زیر و نتایج حاصله را در نمودارهای زیر آورده شده است. جدول ۱: شرایط اولیه زیرکانال‌های مورد بررسی

منبع	شماره نمونه	طول کانال	شار حرارتی (kw/m)	دما ورودی (c)	دبی جرمی	فشار (bar)	قطر کانال (m)
	۱	۱,۵	۴۴۰	۲۴۸	۹۹۸	۶۸	۰,۰۱۲
	۲	۱,۵	۱۱۳۰	۲۲۹	۹۶۶	۱۰۸	۰,۰۱۲
	۳	۱,۵	۱۷۰۰	۲۷۲	۲۰۱۴	۱۴۷	۰,۰۱۲

در نمودارهای ۱ و ۲ و ۴ کیفیت خلا بر حسب کیفیت ترمودینامیکی بخار رسم شده است، از مقایسه نتایج با نتایج تجربی می‌توان دریافت که مدل به کار گرفته در این کار دقت خوبی برخوردار است. در نمودار ۳ تغییرات کیفیت خلا را برای دماهای ورودی متفاوت سیال در فشار ۱۰۸ بار رسم نموده و نتایج را با کد RELAP5 مقایسه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید با افزایش دما شروع جوشش زیر سرد زودتر رخ داده و بخار زودتر تولید می‌شود و همچنین افزایش دمای ورودی باعث افزایش بخار تولید شده در طول کانال می‌کند.

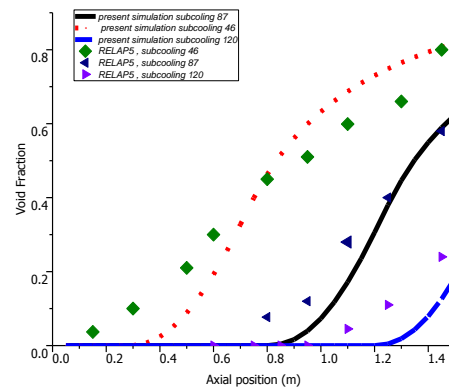
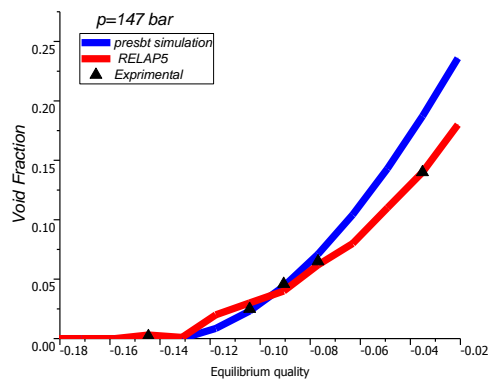
در نمودار ۶ در فشار ۱۰۸ بار و دمای ورودی ۲۲۹ درجه سانتی گراد تغییرات سرعت مخلوط و در نمودار ۵ تغییرات چگالی مخلوط در طول کانال را مشاهده می‌کنید همان‌طور که از قانون پیوستگی مخلوط مشخص

است دبی جرمی در طول کانال باید ثابت بماند که در مقایسه دو نمودار زیر با تولید بخار با کاهش چگالی سرعت مخلوط افزایش می‌یابد و ضرب این دو در طول کانال همیشه مقداری ثابت است. علاوه بر این شیب کاهش چگالی با شروع جوشش زیر سرد افزایش یافته که دلیل آن کم بودن چگالی بخار نسبت به مایع در طول کانال می‌باشد که شیب افزایش سرعت مخلوط با تولید بخار نیز افزایش می‌یابد که به دلیل کاهش بیشتر چگالی در طول کانال و همچنین زیاد بودن سرعت بخار نسبت به مایع است.



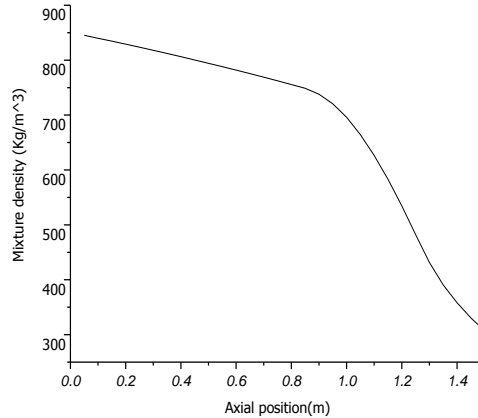
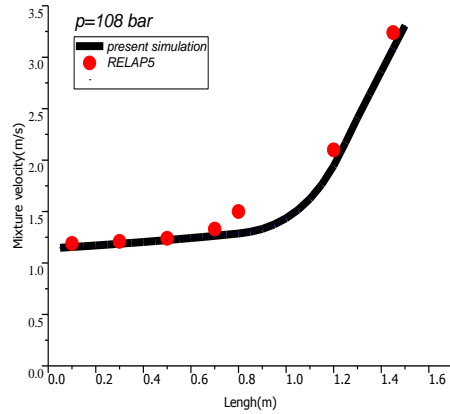
نمودار ۲: مقایسه کسر خلا با کیفیت بخار ترمودینامیکی در فشار ۶۸ بار

نمودار ۱: مقایسه کسر خلا با کیفیت بخار ترمودینامیکی در فشار ۱۰۸ بار



نمودار ۴: مقایسه کسر خلا با کیفیت بخار ترمودینامیکی در فشار ۱۴۷ بار

نمودار ۳: تغییرات کسر خلا در طول کانال در دماهای ورودی متفاوت در فشار ۱۰۸ بار



نمودار ۵: تغییرات چگالی مخلوط در طول کانال در فشار ۱۰۸ بار
 نمودار ۶: تغییرات سرعت مخلوط در طول کانال در فشار ۱۰۸ بار

بحث و نتیجه گیری :

با توجه به اهمیت جریان‌های دوفازی در صنایع مختلف مخصوصاً صنعت هسته‌ای در این کار سعی شده با ادغام معادلات شار رانشی و معادله انتقال سطح تماس مشترک (IATE) و انتخاب یک روش عددی مناسب برای حل معادلات مدلی برای جریان‌های دوفازی ارائه شود که از دقت بالا و پایداری عددی بهتری برخوردار باشد روش تصویر از نظر سادگی و دقت و سرعت همگرایی نسبت به سایر روش‌های عددی برتری دارد برای حل معادلات شار رانشی در حالت پایا از روش تصویر استفاده شده است. در قسمت نتایج به منظور مقایسه عملکرد مدل پیشنهادی، نتایج حاصل از این پژوهش را با نتایج تجربی و کد RELAP5 مورد مقایسه قرار گرفت که همان‌گونه که بیان شد مدل پیشنهادی از دقت مناسب و پایداری عددی خوبی برخوردار می‌باشد.

مراجع :

- [1] “RETRAN-3D- A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow Systems: Volume 1: Theory and Numerics (Revision 3)”, NP-7450- V1R3, Electric Power
- [2] Fillion, Ph, Chanoine, A, Dellacherie, S, Kumbaro, A, “FLICA-OVAP: A new platform for core thermal-hydraulic studies”, Nuclear Engineering and Design, 241, p. p. 4348–4358, 2011.
- [3] Talebi, S., Kazeminejad, H., Davilua, H., “A numerical technique for analysis of transient two-phase flow in a vertical tube using the drift flux model”, Nuclear

- Engineering and Design, 242, p. p. 316-322, 2012.
- [4] Rong Situ, Takashi Hibiki, Mamoru Ishii, Michitsugu Mori. "Bubble Lift-off in Forced Convective Subcooled Boiling Flow". International Journal of Heat and Mass Transfer 48(2005) 5536-5548
- [5] N.E. Todreas, M.S. Kazimi, Nuclear systems I: Thermal Hydraulic Fundamentals, Taylor & Francis, 1990.
- [6] RELAP5, 1999. RELAP5/MOD3 Code manual, NUREG/CR]94[-5535. Sciencetech, Inc., Idaho Falls.
- [7] Andersen, JGM, Harrington R, Hizoum B,]93["COBRAG Subchannel Code: Model Description Report NEDE-32199P", Revision 1, 80 p, 2007.
- [8] Hibiki, T., Ishii, M., 2002. Development of one-group interfacial area transport equation in bubbly flow systems. Int. J. Heat Mass Transfer 45, 2351–2372..
- [9] Chexal, B.,]91["Chexal-Lellouche void fraction correlation for generalized applications", NSAC- 139, 1991. [21] [22] R. Brndt, G. HAUFLE, G. NEUER, Thermal conductivity and emittance of solid UO₂, Purdue University, 1976.